

0718840-1

На правах рукописи

ФАДЕЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы,
включая их управление и регулирование

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань – 2000

Диссертация выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А. Н. Туполева на кафедре электрооборудования.

Научный руководитель

– доктор технических наук,
профессор В. С. Терешук

Официальные оппоненты:

– доктор технических наук,
профессор А. В. Железцов
– кандидат технических наук,
доцент А. Н. Борисов

Ведущее предприятие:

– Департамент развития и
внедрения новых разработок
ОАО «КАМАЗ»

Защита диссертации состоится “26” декабря 2000 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета К 063.43.06 в Казанском государственном техническом университете им. А. Н. Туполева в ауд. 3176 3-го учебного здания по адресу: Казань, ул. Толстого, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им. А. Н. Туполева.

Ваши отзывы, заверенные печатью, в двух экземплярах просим высылать по адресу: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

Автореферат разослан “23” ноября 2000

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947716

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
д.т.н., профессор

А. Ю. Афанасьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность работы. В настоящее время электрооборудование (ЭО) современных автомобилей характеризуется все большим усложнением систем оборудования, увеличением степени автоматизации и трудоемкости проектирования. В связи с увеличением количества и мощности потребителей электроэнергии на автомобиле ее производство, передача и распределение значительно усложнились. С ростом рыночной экономики появляются множества новых моделей и различных модификаций автомобилей, сроки проектирования которых должны уменьшаться для повышения их конкурентоспособности на отечественном и мировом рынке.

Противоречие между усложнением систем электрооборудования автомобилей, повышением требований к качеству проектных документов и сжатыми сроками выполнения работ по разработке опытных образцов и перспективных разработок является принципиально неразрешимым при неавтоматизированным проектированием. Выходом из создавшегося положения является широкое внедрение систем автоматизированного проектирования (САПР) в практику разработки электрооборудования автомобилей. Однако работы по созданию САПР электрооборудования автомобилей также требуют значительных трудозатрат.

Для решения схемотехнических задач при проектировании ЭО автомобилей сотрудниками кафедры электрооборудования КГТУ им А. Н. Туполева разработан комплекс расчетных программ для выполнения автономно разрешимых решающих процедур: выбор аппаратов защиты, разводка электрических цепей, оптимизация сечений проводов и анализ режимов работы электрической сети автомобиля.

Основными трудностями создания системы сквозного проектирования пучков проводов, как отмечается в литературе, является отсутствие компьютерной модели автомобиля, которая дает возможность автоматизировано проектировать прокладку пучков проводов по автомобилю, получать реальные длины их участков, создавать монтажные схемы в интегрированной среде проектирования автомобиля.

В настоящее время в автомобильной промышленности широко используются CAD/CAM системы, имеющих графику 3D, для автоматизированного проектирования конструкции автомобилей. В подобных системах можно создавать трехмерную компоновочную модель автомобиля, которая в дальнейшем может быть использована в качестве модели монтажного пространства в различных приложениях CAD/CAM систем, позволяющих осуществлять проекти-

рование пучков проводов электрической сети непосредственно на модели автомобиля.

В диссертационной работе рассматривается взаимосвязь отдельных задач конструкторского проектирования систем ЭО при разработке проводного электрооборудования автомобилей. Предметом исследования является топологический синтез систем ЭО автомобилей, а система автоматизированного проектирования ЭО автомобилей рассматривается как инструмент, реализующий методы синтеза.

Разработка методов и алгоритмов синтеза систем ЭО в составе математического обеспечения САПР ЭО автомобилей, предназначенной для использования на различных стадиях этапа внутреннего проектирования автомобиля, и их внедрение в практику автомобилестроительных КБ представляет собой актуальную проблему, а ее решение имеет определенное экономическое значение.

Цель работы и основные задачи исследования. Цель работы заключается в разработке методов и алгоритмов синтеза систем ЭО автомобилей, ориентированных на задачи технического проектирования, решаемые отделами ЭО автомобилестроительных КБ.

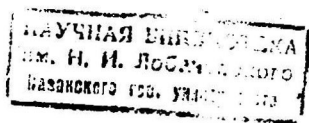
Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Исследование ЭО автомобилей и процесса его проектирования для разработки структуры процесса автоматизированного проектирования.
2. Разработка логической схемы автоматизированного проектирования и общего алгоритма синтеза систем ЭО автомобилей.
3. Разработка методов и алгоритмов топологического синтеза систем ЭО.
4. Внедрение методов и алгоритмов синтеза в процесс проектирования ЭО автомобилей с применением программ САПР.

Методы исследований. Разработка логической схемы проектирования и общего алгоритма синтеза основывались на теории системного проектирования сложных технических систем, общей методологии и аксиоматике построения САПР. Разработка методов и алгоритмов решения задач синтеза строилась на основе теории множеств, теории неориентированных графов, комбинаторной оптимизации.

Научная новизна работы.

1. Разработана логическая схема проектирования и общий алгоритм синтеза систем электрооборудования автомобилей.
2. Предложен подход и разработан алгоритм изменения конфигурации электрической сети автомобилей.



3. Разработан метод решения задачи разводки электрических цепей с оптимальным распределением допустимых потерь напряжения при изменении конфигурации электрической сети.
4. Разработан алгоритм формирования конфигурации пучков проводов с применением CAD/CAM систем, имеющих графику 3D.
5. Разработана упрощенная схема и алгоритм проектирования систем ЭО автомобилей на основе существующего программного обеспечения с применением CAD/CAM систем, имеющих графику 3D.
6. Разработана методика выбора аппаратов защиты электрических сетей автомобилей с учетом групповой защиты потребителей электроэнергии, работающих в различных режимах, технологического и температурного разброса параметров аппаратов защиты.

Практическая значимость работы. Разработанные логическая схема проектирования и общий алгоритм синтеза позволяют решить задачу системного проектирования ЭО автомобилей и получить оптимальные проектные решения.

Применение разработанных методов решения задачи разводки электрических цепей при изменении конфигурации электрической сети позволило получить 20–30% экономии проводных материалов по сравнению с базовым вариантом.

Разработанная методика выбора аппаратов защиты электрических цепей позволяет более обоснованно осуществлять выбор аппаратов защиты, что повысит надежность работы и безопасность эксплуатации электрической сети.

Разработанные логическая схема проектирования, общий алгоритм синтеза систем ЭО автомобилей, а также оптимизационные методы и алгоритмы инвариантны к различным типам автомобилей, что позволяет унифицировать расчеты, разрабатывать соответствующие отраслевые стандарты.

Внедрение результатов работы. Разработанные методы и алгоритмы топологического синтеза систем ЭО и методика выбора аппаратов защиты используются в ОАО «КАМАЗ», ООО «Автомастер» (г. Набережные Челны), а также в учебном процессе специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов» КГТУ им. А. Н. Туполева.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Юбилейной научной конференции «Актуальные проблемы высшего образования и научных исследований», Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 1997г.; IV Научно-методическом семинаре «Перспективные CAD/CAM/CAE технологии в высшей технической школе», Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 1997г.; III Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов,

Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 1997г.; VIII Всероссийских туполевских чтений студентов, Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 1998г.; I Международной научно-практической конференции «Автомобиль и Техносфера», ICATS'99, Казань, 1999г.; Научно-практической конференции «30 лет ОАО «КАМАЗ» «Перспективы развития автомобилей и двигателей в республике Татарстан», Набережные Челны, 1999 г.; XVI Всемирном конгрессе IMACS'2000, г. Лозанна (Швейцария).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 119 страниц машинописного текста, 20 рисунков, 2 таблицы, библиографический список – 117 наименований на 11 страницах, приложения – 15 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель и основные задачи диссертации, показана ее научная новизна и практическая ценность, приведена информация о структуре, апробации и публикации основных результатов диссертации.

В первой главе проведен анализ и декомпозиция систем ЭО автомобилей как объекта проектирования автомобилестроительного КБ. Как объект проектирования ЭО автомобилей рассматривается с позиций задач, решаемых отделами ЭО автомобилестроительных КБ. Поэтому в состав объекта проектирования включены все электротехнические и электронные системы, связанные по схемным и геометрическим признакам, а также единством проектных задач технического проектирования. Выделены основные признаки, характеризующие ЭО автомобилей как сложную систему.

При декомпозиции объекта проектирования в структуре систем ЭО выделены схемный и геометрический (конструктивный) основные аспекты рассмотрения. Схемный аспект характеризуется отношениями между элементами множества электрических соединений, связывающих между собой элементы систем ЭО. Описание систем ЭО по геометрическому признаку позволяет осуществить их привязку к конструкции автомобиля.

В соответствии со структурой декомпозиции систем ЭО к категории геометрического аспекта отнесены конструктивные узлы (монтажные блоки, блоки готовых изделий) и конструкции проводного монтажа (пучки проводов), к категории схемного аспекта – внешний (межблочный) электромонтаж. Схемный аспект декомпозиции систем ЭО, как объекта проектирования, отражает его кон-

структивное членение, т.е. каждой конструкции проводного монтажа соответствует электрическая схема пучка проводов.

С системных позиций исследован процесс проектирования систем ЭО автомобилей, в котором, в соответствии со структурой декомпозиции объекта проектирования, выделены основные проектные задачи, заключающиеся в схемотехническом и конструкторском проектировании. Приведен перечень задач схемотехнического проектирования и последовательность их выполнения. Анализ процесса проектирования позволил произвести постановку основных оптимизационных задач при синтезе систем ЭО автомобилей:

1. Топологический синтез внешнего проводного монтажа. Основой этапа являются задачи разводки электрических цепей и формирование пучков проводов (термин «пучок проводов» использован в соответствии с принятым в ОАО «КАМАЗ» условным обозначением жгута, т.к. результаты исследования внедрялись на данном предприятии). Решение этих задач, соответствующих этапу конструкторского проектирования, составляет основу данного исследования.
2. Синтез систем распределения электрической энергии и их параметрическая оптимизация, вызванные сложным итерационным характером процесса проектирования, необходимостью учета многорежимности работы электрической сети и потерь напряжения в проводах.

Произведен анализ литературы по теме диссертации. В КБ электрооборудования грузовых автомобилей ЗИЛ разработана САПР электрооборудования автомобилей, состоящая из трех основных подсистем: графическая (система проектирования плоскостных символьных схем); аналитическая (комплекс программ, осуществляющих автоматизированный анализ графических документов); расчетная (пакет прикладных программ, выполняющий специализированные расчеты, стандартизированные в отрасли). В данной системе отсутствует компьютерная модель автомобиля, что не позволяет перейти к сквозному проектированию пучков проводов. В комплексе расчетных программ, разработанном на кафедре электрооборудования КГТУ им А. Н. Туполева, решены системные вопросы лишь для некоторых задач из общего цикла проектирования систем ЭО автомобилей. Данный комплекс программ является продолжением работ по созданию САПР электрооборудования летательных аппаратов, которые велись на кафедре в 80–90-х годах ее сотрудниками (А. А. Цой, А. М. Нотариус, В. П. Горячкин, В. Н. Кушниренко и др.) под руководством В. С. Терещука. В работе Ефимова В. И., Милютин О. И. и Киреева Ю. Н. исследованы вопросы анализа и синтеза систем электроснабжения автомобилей с позиций задач обеспечения требуемого качества электрической энергии.

Анализ литературы показал, что нет разработок системного подхода к общей организации процесса проектирования систем ЭО автомобилей в САПР. В смежной области при проектировании электрооборудования летательных аппаратов имеются работы Терещука В. С., в которых достаточно полно исследована задача синтеза оптимальных систем бортового электрооборудования летательных аппаратов с использованием системного подхода к проектированию больших технических систем, изложенного в трудах К. Д. Жука и А. А. Тимченко.

Проведенный анализ конфигураций электрических сетей автомобилей позволил предложить изменение традиционной конфигурации, что требует разработки эффективных алгоритмов и методов решения задач разводки электрических цепей, которые не нашли отражения в литературе. Однако, некоторые подходы и идеи, изложенные в известных работах по разводке электрических цепей, могут быть использованы при топологическом синтезе систем ЭО автомобилей.

Проектирование пучков проводов в известных работах осуществляется в двумерном пространстве и, следовательно, при этом теряется связь с реальным монтажным пространством объекта и не точно учитываются запрещенные зоны, обладающие сложной конструкцией.

Во второй главе проведено исследование систем ЭО автомобилей, в результате которого предложена системная модель ЭО как конечной цели проектирования, состоящей из дерева конструктивных узлов и дерева внешнего монтажа.

Дерево строения системы электроснабжения построено по функциональным признакам, в котором элементы высших уровней обеспечивают централизованное питание элементов низших уровней. В силу многорежимности и необходимости учета внутреннего состояния система электроснабжения рассматривается как динамическая система и в качестве "единицы" ее функционального состояния предлагается использовать режимы работы цепей питания групп потребителей. Под режимом работы цепи понимается множество возможных схемных режимов, характеризующихся неизменностью топологии схемы в пределах режима, и нагрузочных режимов потребителей, отличающихся токами, протекающими через АЗ, и характеризующихся установившимися или квазиставившимися процессами.

С позиций системного подхода процесс решения взаимосвязанных задач проектирования систем ЭО автомобилей формализован в виде логической схемы проектирования (ЛСП), полученной на основании анализа существующего процесса проектирования и опыта разработки отдельных методик синтеза систем

ЭО. ЛСП систем ЭО автомобилей состоит из ячеек проектирования, соответствующих задачам S^d , которым при помощи процедур T^d по входной информации A^d и ограничениям C^d ставится в соответствие проектное решение R^d .

В ЛСП выделены 4 уровня декомпозиции процесса проектирования. Задача проектирования первого уровня заключается в размещении элементов систем ЭО. Проектными процедурами данного уровня ЛСП являются: T^{1_1} – формирование ММП (модели монтажного пространства) конструкции автомобиля; T^{1_2} – формирование ММП прокладки пучков проводов; T^{1_3} – предварительное размещение элементов систем ЭО; T^{1_4} – уточненное решение задачи размещения.

Задачей проектирования второго уровня ЛСП является топологический синтез схем электрических соединений внешнего монтажа. Процедурами данного уровня являются: T^{2_1} – разводка сложных электрических цепей; T^{2_2} – разработка эскиза схемы электрических соединений; T^{2_3} – разработка схемы электрических соединений; T^{2_4} – распределение проводов по клеммам элементов; T^{2_5} – формирование конфигурации пучков проводов; T^{2_6} – определение длин участков пучков проводов; T^{2_7} – уточненный расчет длин проводов; T^{2_8} – проверка и корректировка цвета проводов.

Задача проектирования третьего уровня формулируется как параметрическая оптимизация сечений проводов электрической сети и анализ режимов работы. Данный этап включает в себя процедуры: T^{3_1} и T^{3_2} – формирования расчетных режимов работы электрической сети; T^{3_3} – выбор аппаратов защиты; T^{3_4} и T^{3_5} – оптимизация сечений проводов распределительной сети; T^{3_6} и T^{3_7} – анализ режимов работы электрической сети.

Задача проектирования четвертого уровня состоит в выборе элементов конструкции пучков проводов и выпуске технической документации и включает процедуры: T^{4_1} – выбор элементов конструкции пучков проводов; T^{4_2} – конструирование установок пучков; T^{4_3} – выпуск электрической схемы; T^{4_4} – выпуск чертежей пучков, таблиц проводов, спецификаций; T^{4_5} – выпуск чертежей установок пучков и спецификаций.

Структура ЛСП систем ЭО описывается матрицей структуры $S = \|S_{s,r}\|_{s \in \overline{1, N_k}, r \in \overline{1, 4}}$ и матрицами связей элементов ЛСП $S_{s,r} = \|S_{s,j,r}\|_{j \in \overline{1, N_k}}$, где $r, s = \overline{1, 4}$ – уровни проектирования; $i, j = \overline{1, N_k}$, N_k – число элементов k -го уровня проектирования; $S_{s,j,r}$ – нуль-единичная матрица, характеризующая связь j -й ячейки s уровня с i -й ячейкой r уровня проектирования векторным равенством: $A^s = S_{s,j} R^{j'}$.

Анализ матрицы структуры S и матриц связей $S_{s,r}$ свидетельствует о существовании обратных связей между уровнями и внутри уровней проектирова-

ния, что требует организации итерационных циклов. Это говорит о существовании автономно-неразрешимых задач, для которых часть исходной информации на нулевой итерации определяется прогнозированием $A_{(1)}^{d_i} (R_0^{f_j} | M_0^{f_i})$ ($f > d \vee f = d, j > i$), а затем итерацией $A_{(1)}^{d_i} (R^f | M^f)$. К ним относятся задачи (S^{1_1}, S^{1_4}) , S^{2_1} и (S^{3_4}, S^{3_5}) . Это говорит о том, что задача синтеза систем ЭО автомобилей является слабоструктурированной.

Организован процесс системного проектирования систем ЭО упорядочиванием проектных процедур ЛСП, который назван общим алгоритмом синтеза систем ЭО (ОАСС ЭО). ОАСС ЭО состоит из следующих шагов:

1⁰. Выполняется последовательность процедур $\langle T^{1_1}, T^{1_2}, \overline{T^{1_3}}, T^{2_1} \rangle$, где линии сверху обозначают итерационный цикл. При этом выполняется итерация, когда элементы размещаются сначала только с учетом электрических связей между ними и ограничений, задаваемых ММП автомобиля, а затем учитываются результаты разводки электрических цепей.

$$2^0. \langle T^{1_4} \rangle \langle \overline{T^{2_1}, T^{2_2}, T^{2_3}, T^{2_4}, T^{2_5}, T^{2_6}, T^{2_7}, T^{2_8}, T^{3_1}, T^{3_2}, T^{3_3}, T^{3_4}, T^{3_5}, T^{3_6}, T^{3_7}} \rangle.$$

Здесь разрешимость задачи достигается за счет итерационных циклов:

1. Разводка цепей осуществляется вначале с учетом сечений проводов, выбранных по схемно-конструктивным требованиям, а после оптимизации сечений проводов разводка корректируется.
2. Сначала на основании результатов разводки цепей создается эскиз схемы электрических соединений, затем разводка корректируется с учетом конфигурации пучков проводов и разрабатывается уточненный вариант схемы электрических соединений.
3. Параметрический синтез электрической сети в целом осуществляется вначале при сечениях, выбранных по схемно-конструктивным требованиям, а после оптимизации и анализа режимов работы процесс снова повторяется.

3⁰. На данном шаге выполняется последовательность:

$$\langle T^{1_4} \rangle, \langle T^{2_1}, T^{2_2}, T^{2_3}, T^{2_4}, T^{2_5}, T^{2_6}, T^{2_7}, T^{2_8} \rangle, \langle \overline{T^{3_3}, T^{3_4}, T^{3_5}, T^{3_6}, T^{3_7}, T^{4_1}} \rangle, \langle T^{4_2}, T^{4_3}, T^{4_4}, T^{4_5} \rangle.$$

Выполняются итерации, когда после выбора элементов конструкции пучков проводов повторяется процесс оптимизации сечений проводов.

4⁰. Осуществляется оптимизация решения общей задачи проектирования систем ЭО выполнением итераций, охватывающих все уровни проектирования.

Общий алгоритм синтеза позволяет решить задачу системного проектирования ЭО автомобилей логической увязкой автономно-неразрешимых задач,

организовать итерационные циклы для получения оптимальных проектных решений; упорядочить создание алгоритмов синтеза, составляющих основу решающих процедур ЛСП.

Общая характеристика ЛСП систем ЭО позволяет выделить в ней два блока: инвариантный и настраиваемый. Инвариантный блок мало зависит от особенностей проектирования в различных автомобилестроительных КБ, включает в себя решающие процедуры первых трех уровней проектирования и требует сравнительно небольшой настройки на проектный процесс конкретного КБ. Настраиваемый блок включает в себя процедуры четвертого уровня проектирования и значительно учитывает специфику конкретного КБ и требует отдельных исследований и разработок.

Разработанная ЛСП систем ЭО дает возможность для реализации решающих процедур ($T^1, T^2, T^3, T^4, T^5, T^6, T^7, T^8, T^9, T^{10}$) использовать CAD/CAM системы имеющие 3D графику, что позволяет осуществлять автоматизированное проектирование внешнего монтажа непосредственно на компоновочной модели автомобиля.

В третьей главе решаются задачи топологического синтеза систем ЭО автомобилей (основные задачи второго уровня ЛСП). Проведенный анализ конфигураций электрических сетей автомобилей показывает, что при традиционной конфигурации (рис.1) допустимая токовая нагрузка большей части проводов значительно превышает фактическую. В большинстве случаев это вызвано необходимостью их защиты предохранителем. С целью уменьшения объема используемого проводникового материала предлагается изменить конфигурацию сети (рис.2) посредством установки дополнительных предохранителей (ДПР). Введение ДПР также повышает эффективность защиты самих потребителей.

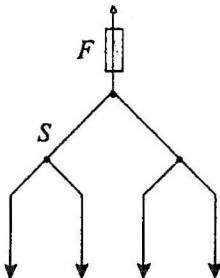


Рис. 1

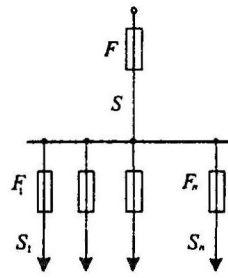


Рис. 2

Изменение конфигурации сети подразумевает решение двух задач:

1. Задача разводки цепей питания групп потребителей, где критерием оптимальности является суммарная масса (объем) проводов цепи. Эта задача решается отдельно для каждой цепи питания группы потребителей.
2. Оценка целесообразности изменения конфигурации, где критерием является стоимость элементов всех цепей.

В случае отклонения возможности изменения конфигурации сети по причине значительного увеличения стоимости цепей, можно рассмотреть дополнительные способы снижения массы электрической сети автомобилей:

1. Необходимо исследовать возможность замены используемых марок проводов на провода, обладающие лучшей перегрузочной характеристикой и механической прочностью, что позволит снизить минимальное сечение проводов, определяемое по схемно-конструктивным требованиям. В качестве таких проводов могут быть использованы некоторые марки авиационных проводов.

2. Решать задачу разводки цепей с применением муфт сращивания, что позволит уменьшить суммарную длину, а в итоге и массу проводов сети.

При предлагаемой конфигурации задача разводки цепи питания групп потребителей представлена как задача нахождения медианы графа для заданного подмножества его вершин, при этом вводятся один или два блока ДПР. ММП при решении задачи модификации строится по пучкам проводов базового автомобиля, а при проектировании нового автомобиля может быть сформировано конструктором непосредственно на компоновочной модели объекта. ММП описывается графом $M = (X, F)$, где множество вершин $X = X_{\text{элемент}} \cup X_{\text{ветвь}}$ ($X_{\text{элемент}} \cap X_{\text{ветвь}} = \emptyset$), где $X_{\text{элемент}} = \{x_1, \dots, x_L\}$ — соответствует выводам всех элементов сети; $X_{\text{ветвь}} = \{x_{L+1}, \dots, x_N\}$ — соответствует точкам ветвлений пучков проводов. Ребрам $f_j \in F$ ставится в соответствие расстояние l_j , $j \in I = \{1, \dots, N\}$.

Сначала рассматривается случай введения одного блока ДПР. Для заданного подмножества вершин $P \subset X_{\text{элемент}}$, соответствующих элементам цепи, и точке ее питания $x_i \in X_{\text{элемент}}$ определяется местоположение блока ДПР (вершина x_k), чтобы минимизировать выражение:

$$G = \min_{x_k \in X} \sum_{x_j \in F \cup \{x_k\}} G_{kj}, \quad (1)$$

где показатель качества участка (x_k, x_j) цепи $G_{kj} = g_{kj}(S_{kj}) \cdot (l_{kj} + \Delta l_k)$; $g_{kj}(S_{kj})$ — погонная масса провода сечением S_{kj} , соединяющего блок ДПР с j -м элементом; l_{kj} — длина участка (x_k, x_j) ; Δl_k — длина отклонения пучка проводов от вершины x_k до места установки блока ДПР.

Многорежимность работы потребителей обычно учитывается при оптимизации сечений проводов. Однако, т.к. G_{ij} в выражении (1) существенно зависит от режимов работы потребителей $r \in R$, то задача топологического синтеза также должна решаться с учетом многорежимности, когда сечения проводов определяются условием:

$$S = \max(S_{\text{наг}}, S_{\text{пр}}, S_{\text{мех}}), \quad (2)$$

где $S_{\text{наг}}, S_{\text{пр}}, S_{\text{мех}} \in S^*$ – минимальные сечения, выбранные из условий допустимой токовой нагрузки, защищаемости предохранителем и механической прочности, соответственно; S^* – множество стандартных значений используемых сечений проводов. Токовая нагрузка головного участка цепи (x_s, x_k) в r -м режиме должна определяться как $I_{sk}^{(r)} = \sum_{x_j \in P} I_j^{(r)}$, а q -го участка: $I_q = \max_{r \in R} I_q^{(r)}$.

Для уменьшения размерности задачи сформулировано утверждение:

Утверждение. При предлагаемой конфигурации электрической сети медианой подграфа, построенного на вершинах множества $P \cup \{x_s\} \subset X_{\text{элем}}$, не могут являться вершины $x_k \in X_{\text{элем}}$ ($k = \overline{1, L}$), кроме вершины $x_s \in X_{\text{элем}}$, соответствующей точке питания цепи.

Доказательство. Граф $M = (X, F)$ является графом древовидной структуры, крайние вершины которого – вершины $x_k \in X_{\text{элем}}$ ($i = \overline{1, L}$). Ближайшей к вершине $x_k \in X_{\text{элем}}$ является одна из вершин $x_m \in X_{\text{вст}}$.

Введены следующие допущения:

1. Погонная масса провода головного участка цепи $g \geq 1$.
2. Погонная масса проводов остальных участков равна 1.
3. Величина Δl_k не учитывается.

Доказательство утверждения ведется от противного и рассматривается 3 случая: $x_k \in P$; $x_k \notin P$; $x_k = x_s$. При этом определяется значение целевой функции (1) при размещении блока ДПР в вершине $x_k \in X_{\text{элем}}$ и ближайшей к ней $x_m \in X_{\text{вст}}$, и доказывается ошибочность предположения, кроме 3-го случая.

Дополнительно введено условие, ограничивающее поиск медианных вершин в $X_{\text{вст}}$ до множества $X_\delta = \{x_i | x_i \in X_{\text{вст}}, l_{is} \leq \max l_{ob}\}$, $i = L+1, \dots, N$ для $\forall x_a, x_b, x_c \in P \cup \{x_s\}$, $x_a \neq x_b$.

При введении двух блоков ДПР рассматривается их параллельное подключение к точке питания (радиальная конфигурация распределительной сети) и последовательное (магистральная). Данные задачи сформулированы как задачи целочисленного программирования с булевыми переменными, которые сведены к комбинаторным задачам оптимального разбиения подмножества P на два непересекающихся непустых подмножества $P_1 \cup P_2 = P$ и нахождения медиан

ного множества X_k ($|X_k| = 2$), соответствующих минимуму целевой функции $G(P_1, P_2)$. При радиальной конфигурации целевая функция записывается:

$$G(P_1, P_2) = \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{x_j \in P_i} G_{(ii)j} + G_{(ii)i} \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где индекс (ii) означает размещение i -го блока в вершине $x_i \in X_k \cup \{x_s\}$, значения $G_{(ii)j}, G_{(ii)i}$ определяются подобно показателю качества в (1).

На каждом шаге алгоритма решения для выбранного множества X_k определяется начальное разбиение P на P_1 и P_2 и осуществляется перераспределение вершин подмножеств P_1 и P_2 , приводящее к уменьшению значения целевой функции. Начальное разбиение множества P выполняется с помощью алгоритма, разработанного на основе процедуры древовидного поиска p -медиан, позволяющего определять оптимальное распределение потребителей по блокам ДПР. После выполнения всех шагов выбирается вариант с наименьшим значением целевой функции.

При магистральной конфигурации целевая функция имеет вид:

$$G(P_1, P_2) = \sum_{i=1}^2 \sum_{x_j \in P_i} G_{(ii)j} + G^* \rightarrow \min, \quad (4)$$

Также сначала определяется начальное разбиение P . Затем решается задача последовательного подключения блоков к точке питания:

$$G^* = \sum_{x_q \in X_k \cup \{x_s\}} \sum_{x_v \in X_k} G_{qv} w_{qv}, \quad (5)$$

при условиях $\sum_{x_v \in X_k} w_{qv} \leq 1, x_q \in X_k \cup \{x_s\}; \sum_{x_q \in X_k \cup \{x_s\}} w_{qv} = 1, x_v \in X_k;$

$w_{qv} = \begin{cases} 1, & \text{если } q\text{-я и } v\text{-я вершина соединены и ток течет от } q\text{-й вершины к } v\text{-й,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Для решения задачи (5) блоки ДПР представлены нагрузками, сосредоточенными в вершинах $X_k = \{x_{kt}\}, t = 1, 2$, ток которых определен $I_t = \max_{r \in R} \sum_{x_j \in P_i} I_j^{(r)}$.

Используя правила выбора очередного подключаемого блока: $I_{qv} = \min_{x_v \in X_k} I_{qv}$ или

$I_{qv} = \max_{x_v \in X_k} I_v$ ($\bar{X}_k \subset X_k$ — множество вершин еще не подключенных к цепи), формируем варианты последовательной цепи и выбираем с меньшим значением

целевой функции. Далее осуществляется перераспределение потребителей по блокам для уменьшения целевой функции (4). После выполнения всех шагов выбирается вариант с наименьшим значением целевой функции.

Для каждой цепи питания группы потребителей определяется способ разводки при изменении конфигурации сети по минимуму массы проводов, и про-

изводится оценка целесообразности изменения конфигурации. Практическая реализация предлагаемой конфигурации возможна при использовании предохранителей, не требующих обслуживания и замен, например, полимерных самовосстанавливающихся предохранителей и мультиплексного управления коммутацией потребителей, что учитывается в определении стоимости изменения конфигурации.

Проводимый анализ полученных решений на удовлетворение условия допустимых потерь напряжения, позволяет выявить цепи питания групп потребителей, для которых получено полное оптимальное решение, и цепи, задачу разводки которых необходимо решать с учетом допустимых потерь напряжения. При этом содержательная постановка задач разводки при изменении конфигурации сети не изменяется, лишь добавляются ограничения:

1. При введении одного блока ДПР: $\Delta U'_{rj} + \Delta U'_{sk} \leq \Delta U_j$, $x_j \in P, r \in R$,

где $\Delta U_j = U_i - U_j$; U_j – минимальное допустимое напряжение питания j -го потребителя; U_i – минимальное напряжение в точке питания;

$\Delta U'_{rj} = I'_j \cdot (r_{sj}(S_{sj}) \cdot (I_{sj} + \Delta I_s) + r_{sj}^f)$ – потеря напряжения на участке (x_s, x_j) в r -м режиме; I'_j – расчетный ток на участке (x_s, x_j) цепи питания в r -м режиме; $r_{sj}(S_{sj})$ – погонное сопротивление участка (x_s, x_j) цепи сечением $S_{sj} \in S^*$; r_{sj}^f – переходное сопротивление предохранителя, защищающего участок (x_s, x_j) .

2. При радиальной конфигурации сети:

$$\Delta U'_{(st)j} + \Delta U'_{s(st)} \leq \Delta U_j, x_j \in P_t, t = 1, 2, r \in R.$$

3. При магистральной конфигурации:

$$\Delta U'_{(st)j} + \frac{1}{2} \sum_{x_q \in X_s \cup \{x_r\}} \sum_{x_v \in Y_s} \Delta U'_{qv} \cdot k'_{qv} \leq \Delta U_j, x_j \in P_t, t = 1, 2, r \in R,$$

$$k'_{qv} = \begin{cases} 1, & \text{если участок цепи } (x_q, x_v) \text{ является частью цепи, соединяющей точку} \\ & \text{питания с } t\text{-м блоком ДПР,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В ограничения также вводится нижняя граница S_{sj}^{\min} сечений проводов участков, определяемая по (2), что позволяет уменьшить количество вычислений.

При введении одного блока ДПР задача решается в два этапа. На первом для каждого возможного размещения блока ДПР, определяются оптимальные сечения проводов участков цепи, задаваясь входным напряжением на блоке из ряда $U = \{U^{(i)} | i = 1, p-1\}$ при условии: $\max_{x_j \in P} \Delta U_{sj \max} \leq U^{(i)} \leq U_i - \Delta U_{sk \max}$, где

$U^{(i)} = \frac{i}{p} \left(U_i - \max_{x_j \in P} U_j \right)$, p – целое число, $\Delta U_{ij \max} = \max_{r \in R} \Delta U_{ij \max}^r$ при $x_j \in P \cup \{x_r\}$, $\Delta U_{ij \min}^r$ – потеря напряжения, определяемая при сечении S_{ij}^{\min} . На втором этапе выбирается оптимальный вариант размещения блока ДПР.

При радиальной конфигурации сети задача определения сечений участков цепи решается отдельно для каждого подмножества P_1 и P_2 , аналогично рассмотренному случаю, и производится улучшение полученного решения перераспределением потребителей между блоками при удовлетворении условия допустимых потерь напряжения.

Для решения задачи разводки цепи при магистральной конфигурации сети множество X_6 разбивается на X_{61} и X_{62} , в которых определяется оптимальное размещение блоков ДПР (вершин $x_{\kappa 1}$ и $x_{\kappa 2}$), соответственно. Аналогично разбиению X_6 множество P делится на подмножества P_1 и P_2 . Множество U делится пополам на подмножества $U_1 = \{U_1^{(m)}\}$ и $U_2 = \{U_2^{(n)}\}$. Теперь задачу разводки можно привести к оптимизационной комбинаторной задаче определения размещений и входных напряжений блоков:

$$G(x_{\kappa 1}, x_{\kappa 2}, U_1^{(m)}, U_2^{(n)}) = \min_{\substack{U_1^{(m)} \in U_1; \\ x_q \in X_{61} \cup \{x_q\}}} \left[\sum_{x_j \in P_1 \cup P_2^* \cup \{x_q\}} G_{ij}^m + \min_{\substack{U_2^{(n)} \in U_2; \\ x_r \in X_{62} \cup \{x_q\}}} \sum_{x_j \in P_2 \setminus P_2^* \cup \{x_q\}} G_{ij}^{m,n} \right] \quad (6)$$

при соответствующих ограничениях,

где $P_2^* = \{x_j | x_j \in P_2, l_{ij} \leq l_{ij}^*\}$ – подмножество вершин, расположенных ближе к x_q , чем к x_r .

На каждом шаге решения данной задачи для выбранного размещения первого подключаемого к точке питания блока $x_q \in X_{61}$ и, задаваясь входным напряжением $U_1^{(m)} \in U_1$ на нем, находим оптимальное размещение второго блока $x_r \in X_{62}$ аналогично введению одного блока ДПР при заданных точке и напряжении питания. Затем определяется оптимальное входное напряжение на первом блоке при его выбранном размещении. Выполнив все $|X_{61} \cup \{x_q\}|$ шагов выбираем оптимальный вариант. Полученное решение может быть улучшено следующей итерацией:

1. Осуществляется перераспределение потребителей между блоками, приводящее к уменьшению целевой функции и при соблюдении условий допустимых потерь напряжения.
2. Зафиксировав распределение потребителей и значения входных напряжений блоков, оптимизируется размещение блоков с одновременной оптимизацией сечений проводов участков цепи по рассмотренному алгоритму.

При решении задач разводки электрических цепей с оптимальным распределением допустимых потерь напряжения одновременно решаются задачи топологического синтеза и определения сечений проводов цепи. Задача параметрической оптимизации в данной постановке может также решаться отдельно после корректировки решения задачи разводки с учетом сформированной конфигурации пучков проводов.

Решением задач разводки определяются дополнительные исходные данные для задачи формирования конфигурации пучков проводов в виде схем электрических соединений. Для разработки ММП прокладки пучков предлагается применять CAD/CAM системы трехмерного проектирования конструкции автомобиля, применение которых позволит упростить данную задачу, повысить адекватность ММП действительному, получать реальные длины проводов при решении задач топологического синтеза, позволит оперативно вносить изменения, что важно при учете требований заказчиков. Сформулирована содержательная постановка задачи, заключающаяся в объединении проводов, соединяющих элементы систем ЭО и дополнительные электросоединители, в пучок и его прокладке по одной из возможных трасс, задаваемых ММП, при минимизации массы проводов, формируемых пучков, и удовлетворении требований технологичности изготовления и электромагнитной совместимости проводов.

Предложен приближенный алгоритм формирования конфигурации пучков проводов, основанный на использовании локальных правил предпочтения при выборе электрических цепей, провода которых будут последовательно формировать пучки проводов.

В четвертой главе рассмотрены вопросы внедрения методов и алгоритмов синтеза в процесс проектирования ЭО автомобилей с применением программ САПР. На основе имеющегося программного обеспечения, включающего в себя комплекс расчетных программ по выбору аппаратов защиты, разводке электрических цепей, оптимизации сечений проводов и анализу режимов работы электрической сети, а также системы трехмерного проектирования пучков проводов разработана упрощенная схема и алгоритм проектирования систем ЭО, являющийся фрагментом ОАСС ЭО. Поэтапный ввод проектирующих процедур не противоречит принципам создания САПР систем ЭО и уже на ранней стадии разработки позволяет получать практические результаты, технический и экономический эффект. По предлагаемой схеме, в рамках тестирования подсистемы трехмерного проектирования пучков проводов Cimasable версии 1.6 CAD/CAM системы Cimatron, проведено проектирование пучка проводов автомобиля «КАМАЗ-5320», разработана выходная документация и выработаны предложения по доработке Cimasable.

В качестве первого шага в реализации единой информационной базы данных САПР систем ЭО автомобилей предложена ее логическая структура, в которой выделены две структурные составляющие:

1. БД нормативно-справочной информации, содержащая данные по изделиям, элементам, электрическим соединителям и проводам, используемых при проектировании автомобилей, а также информацию о монтажном пространстве различных моделей автомобилей;
2. БД проектной информации, включающая данные об элементарно-топологическом составе схем, топологии пучков проводов, расчетных данных по конкретным моделям.

Приведены основные типы записей, предложенных баз данных, и их внутреннее содержание.

Рассмотрены вопросы выбора аппаратов защиты (АЗ) электрических сетей с позиций задач, возникающих при проектировании систем ЭО автомобилей. Предложена методика выбора АЗ, решающая задачи защиты цепей питания групп потребителей, включающих в себя различные виды нагрузок, с учетом многорежимности работы электрической сети, а также температурного и технологического разброса параметров АЗ.

При защите цепи питания группы потребителей, не имеющих токов перегрузки, АЗ выбирается по условию учитывающему одновременность их работы в различных режимах:

$$I_{н.а.} \geq \max_{r \in R} \sum_{i=1}^{n_r} I_{p \max_i}^{(r)},$$

где $I_{н.а.}$ – номинальный ток АЗ; $I_{p \max}$ – максимально возможный ток цепи питания i -го потребителя с учетом климатических условий эксплуатации при соответствующем качестве электропитания; n_r – количество одновременно работающих потребителей в r -м режиме.

При выборе АЗ в цепи питания группы потребителей, в которую включены различные виды нагрузок, каждый режим работы цепи представляется осциллограммой суммарного тока потребления, и выбор осуществляется по:

$$I_{н.а.} \geq \max_{r \in R} I'_{ср.кв.н.},$$

$$t'_{a_i} > t'_i, \text{ при } (t'_k)_{\max} \leq t'_i \leq T' \text{ и } r \in R,$$

где t'_{a_i} – время срабатывания АЗ от среднеквадратичного значения суммарного тока нагрузки $I'_{ср.кв.н.}$ по кривой изменения его значения для времени t'_i ; T' – время перехода процесса потребления в установившийся или квазистационарный процесс.

Предварительный прогрев АЗ токами нагрузки учитывается по эквивалентному току $I_{\text{эк}}$, который вызывает то же время срабатывания устройства, что и ток I , но без предварительного подогрева током $I_{\text{прогр}}$:

$$I_{\text{эк}} = I_{\text{тр}} \sqrt{\frac{I^2 - I_{\text{прогр}}^2}{I_{\text{тр}}^2 - I_{\text{прогр}}^2}},$$

где $I_{\text{тр}}$ – критический ток (ток трогания), время срабатывания АЗ от него равно бесконечности (справочная характеристика).

В качестве одного из основных требований к АЗ предложено осуществлять проверку АЗ на обеспечение защиты потребителей, в частности электродвигателей, которая осуществляется сравнением ампер–секундной характеристики АЗ и предельной характеристики нагрева изоляции электродвигателя в заданном диапазоне токовых нагрузок.

В приложениях приведены: сводная таблица результатов расчета разводки электрических цепей при изменении конфигурации сети; выходная документация по пучкам проводов, разработанная средствами Cimatecable и Cimatron; предложения по доработке Cimatecable версии 1.6 в соответствии с задачами технического проектирования ЭО автомобилей; акты о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана логическая схема проектирования и на ее основе общий алгоритм синтеза, позволяющий решить задачу системного проектирования систем ЭО, организующий итерационные циклы для получения оптимальных проектных решений.

2. Предложен подход к изменению конфигурации электрической сети автомобилей. Решены задачи разводки электрических цепей при изменении конфигурации. Изменение конфигурации электрической сети автомобиля позволяет уменьшить на 20–30% массу проводного материала, используемого при монтаже ЭО автомобилей.

3. В качестве дополнительных способов снижения массы проводов предложено применять способ разводки цепей через муфты сращивания, что позволяет уменьшить суммарную длину проводов. Также необходимо исследовать возможность замены используемых марок проводов на провода, обладающие лучшей перегрузочной характеристикой и механической прочностью, что позволяет снизить минимально возможное сечение проводов. В качестве таких проводов могут быть использованы некоторые марки авиационных проводов.

4. Предложено для разработки ММП прокладки пучков проводов применять CAD/CAM системы трехмерного проектирования конструкции автомобиля, что позволяет упростить данную задачу, повысить адекватность ММП действительному. Предложен приближенный алгоритм формирования конфигурации пучков проводов, основанный на использовании локальных правил предпочтения при выборе электрических цепей, провода которых будут последовательно формировать пучки проводов.

5. Организован итерационный процесс проектирования систем ЭО, являющийся фрагментом общего алгоритма синтеза систем ЭО, с использованием программного обеспечения САПР систем ЭО, включающего комплекс расчетных программ схемотехнического проектирования и систему трехмерного проектирования пучков проводов. Применение разработанного алгоритма проектирования уже на ранней стадии разработки САПР систем ЭО позволяет получить практические результаты, технический и экономический эффект.

6. Разработана методика выбора аппаратов защиты, решающая задачи защиты электрических цепей, возникающих при проектировании ЭО автомобилей. Использование предлагаемой методики позволяет более обоснованно осуществлять выбор аппаратов защиты, что увеличивает надежность работы и безопасность эксплуатации электрической сети.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Терещук В.С., Шакирзянова Н.Ш., Фадеев С.В. Об опыте применения автоматизированной подсистемы расчета автотранспортных средств // Тезисы докладов научной и научно-методической конференции «Актуальные проблемы научных исследований и высшего профессионального образования» / Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева, 1997. – с.140.
2. Терещук В.С., Нигматуллин Ш.М., Салимов Р.И., Фадеев С.В. и др. Сквозное обучение студентов CAD/CAM технологиям по специальностям электрооборудование транспортных средств // Тезисы докладов IV Научно методического семинара «Перспективные CAD/CAM/CAE технологии в высшей технической школе» / Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева, 1997. – с. 34 – 37.
3. Иванов А.А., Фадеев С.В. Анализ конфигураций автомобильных электрических сетей // Тезисы докладов VIII Всероссийских туполевских чтений студентов / Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 1998. – с.61.
4. Терещук В.С., Фадеев С.В. Оптимизация разводки электрической сети автомобиля с учетом ее конфигурации // Труды I Международной научно-практической конференции «Автомобиль и Техносфера» / Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева, 1999. – с.376 – 378.

5. Булдаков В.А., Горячкин В.П., Терещук В.С., Фадеев С.В., Цой А.А. О системе автоматизированного проектирования электрооборудования автомобилей // Труды юбилейной научно-практической конференции «Перспективы развития автомобилей и двигателей в республике Татарстан» / Набережные Челны: ОАО "КАМАЗ", 2000. – с.256 – 259.
6. Горячкин В.П., Нигматуллин Ш.М., Салимов Р.И., Терещук В.С., Фадеев С.В. и др. Применение программ автоматизированного проектирования при обучении студентов специальности электрооборудование автомобилей // Там же – с.286–289.
7. Терещук В.С., Горячкин В.П., Фадеев С.В. О методике выбора аппаратов защиты электрических сетей автомобилей // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева, 2000. – №2. – С.18 – 21.
8. V.S. Tereshchuk, S.V. Fadeev "Use of graph theory methods in algorithms of computer-aided design of automobile electric equipment" // Proc. 16th IMACS World Congress 2000 on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Lausanne, August, 21–25, 2000 (CD-ROM) / IMACS, Rutgers University, New Brunswick, USA. – Cp\712-10.pdf

Формат 60×84 1/16. Бумага газетная. Печать офсетная.
Печ.л. 1,25. Усл. печ.л. 1,16. Усл. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд.л. 1,0.
Тираж 100. Заказ *A188*.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К. Маркса, 10

200